



DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD EN ALEACIONES ZINC-ALUMINIO EMPLEANDO EL CRITERIO DE NIYAMA

Sergio F. Gueijman², Carlos E. Schvezov^{1,2}, Alicia E. Ares^{1,2}

¹ Investigador de la CIC - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Av. Rivadavia 1917, (1033) Capital Federal, Argentina.

² Programa de Materiales, Modelización y Metrología, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones. Félix de Azara 1552. 3300 Posadas-Misiones.

E-mail: aares@fcegyn.unam.edu.ar

RESUMEN

El criterio de Niyama es un parámetro térmico local de uso muy frecuente en software de modelización de la solidificación de aleaciones y que frecuentemente es utilizado para predecir defectos de porosidad en fundiciones de acero. Estudios adicionales muestran que el criterio de Niyama para determinar macro y micro porosidad también podría ser aplicado a otras aleaciones diferentes a los aceros, como por ejemplo a las aleaciones de aluminio A356 y las de aluminio magnesio AZ91D, aunque no se han encontrado validaciones con datos experimentales.

En el presente trabajo se solidificaron unidireccional y horizontalmente aleaciones Zn-Al de diferentes concentraciones (Zn-10%Al, Zn-15%Al, Zn-17,2%Al y Zn-27%Al) empleando una extracción calórica en dos sentidos opuestos. Se analizaron las macroestructuras y microestructuras obtenidas, así como los defectos superficiales, se calcularon los parámetros térmicos de las aleaciones (gradientes de temperatura y velocidades de enfriamiento) a los efectos de calcular los números de Niyama. Se encontró que existen números umbrales críticos a partir de los cuales la macroporosidad es evidente. Además, se modelizaron los números de Niyama utilizando funciones de tipo Lorentzianas negativas.

ABSTRACT

The Niyama criterion is a local thermal parameter very commonly used in the solidification modeling software of alloys and which is often used to predict porosity defects in steel foundries. Additional studies show that the Niyama criterion for determining macro and micro porosity could also be applied to other alloys than steels, such as the A356 aluminum alloy and AZ91D magnesium aluminum alloy, but no have found experimental data validations.

In this paper, Zn-Al alloys at different concentrations (Zn-10% Al, Zn-15% Al, Zn-17,2% Al and Zn-27% Al) were unidirectional solidified using a heat extraction in two opposite directions. For the purpose of calculating the Niyama numbers we analyzed the macrostructures and microstructures, surface defects, and calculated the thermal parameters of the alloys (temperature gradients and cooling rates). It was found that exist critical thresholds numbers from which the macroporosity is evident. In addition, Niyama numbers were modeled using functions type negative Lorentzian.

INTRODUCCIÓN

El 75% del zinc se consume bajo su forma metálica y el 25% restante se emplea aprovechando sus compuestos sobre todo en forma de óxido o sulfuro. El Zn se alea fácilmente con otros metales como el Cu, Ni, Al, Mg, etc., constituyendo aleaciones y fundiciones utilizadas sobre todo en la inyección a presión por la fabricación de piezas por tener buenas propiedades mecánicas, estabilidad dimensional, buena resistencia a la corrosión, buen grado de acabado superficial y la posibilidad de realizar un cromado posterior.

Sin embargo, los procesos de fundición suelen presentar importantes limitaciones en lo que se refiere a la calidad de los productos obtenidos debido a la alta tendencia a la formación de porosidad en las piezas fabricadas. En general, la porosidad ocurre cuando hay contracción debido a la diferencia de densidades en las fases presentes, fallas u obstrucciones en el flujo de líquido interdendrítico ó precipitación de gases disueltos en la aleación [1-3].

Se ha demostrado que el tamaño, la ubicación y la fracción en volumen de la porosidad afecta negativamente a varias propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción y a la fatiga [4]. Entonces, resulta importante la obtención de información cuantitativa sobre el desarrollo de la porosidad como función del tipo de aleación y del proceso de solidificación.

El criterio de Niyama es un parámetro térmico local que es de uso muy frecuente en los programas de software de modelización de solidificación de aleaciones y que frecuentemente es utilizado para predecir defectos de porosidad en fundiciones de acero [5]. Estudios adicionales muestran que el criterio de Niyama para determinar macro y micro porosidad también podría ser aplicado a otras aleaciones diferentes a las de acero, como por ejemplo a las aleaciones de aluminio A356 y las de aluminio magnesio AZ91D, aunque no se han encontrado validaciones con datos experimentales [6].

Según Beckermann [5], se debe asegurar que los números de Niyama sean evaluados a una de temperatura específica

(por ejemplo, 10 % del intervalo de solidificación por encima de la temperatura de solidus, ó en el 90% de la fracción solidificada).

En el presente trabajo se determinan y modelizan los números de Niyama a partir de los datos experimentales de temperatura-tiempo-distancia en probetas zinc-aluminio (ZA) solidificadas unidireccionalmente con dos sentidos de extracción calórica, en un dispositivo horizontal. Se utilizaron cuatro aleaciones zinc-aluminio en el rango hipereutéctico Zn-10%Al (ZA-10), Zn-15%Al (ZA-15), Zn-17,2%Al (ZA-17,2) y Zn-27%Al (ZA-27). Los números de Niyama de dichas aleaciones se evaluaron tanto en la zona líquida, en la zona pastosa, en la zona de solidificación eutéctica y en el sólido, determinándose funciones que representan a cada proceso en función del tiempo y de la posición, correlacionándose los con la macroporosidad observada luego de concluida la solidificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se prepararon aleaciones zinc-aluminio (ZA) hemcilíndricas de las siguientes concentraciones: Zn-10%Al, Zn-15%Al, Zn-17,2%Al y Zn-27%Al (porcentaje en peso) a partir de trozar y pesar convenientemente zinc de grado electrolítico y aluminio de grado comercial. Las aleaciones se solidificaron en crisoles de arcilla en un horno horizontal que tiene un sistema de extracción calórica unidireccional, que permite el enfriamiento simultáneo desde los extremos de las probetas, ver Figura 1 [7]. La temperatura del horno se elevó hasta aproximadamente unos 600 °C ó 700 °C, dependiendo de la concentración de Al en la aleación y hasta lograr la fusión completa, y luego, se desconectó el horno y se dejó enfriar direccionalmente, dejando circular el agua de refrigeración a través de los dos enfriadores horizontales hasta completar la solidificación. Las temperaturas se midieron con termocuplas del tipo K envainadas en pequeños tubos de vidrio Pyrex® que se localizaron longitudinalmente en las probetas y que se situaron a una distancia equiespaciada de aproximadamente 2 cm.

A partir de los datos de temperatura-tiempo-posición obtenidos se determinaron los siguientes parámetros, en función tanto del tiempo cuanto de la posición longitudinal, las velocidades de enfriamiento $\frac{dT}{dt}(x,t)$ para la posición de cada termocupla y los gradientes de temperatura $\frac{dT}{dx}(x,t)$ entre cada par de termocuplas adyacentes. Finalmente se determinó la relación
$$Ny(x,t) = \frac{\left| \frac{dT}{dx} \right|}{\sqrt{\left| \frac{dT}{dt} \right|}},$$
 considerando ambos términos de la misma como promedios para

una posición intermedia entre dos termocuplas adyacentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos de temperatura-tiempo y de la posición de medición de las temperaturas en las probetas (ver Figuras 2 y 3), se determinaron los siguientes parámetros en función tanto del tiempo como de la posición longitudinal:

- las velocidades de enfriamiento para la posición de cada termocupla en función del tiempo (Figura 4),
- los gradientes de temperatura entre cada par de termocuplas adyacentes en función del tiempo (Figura 5).

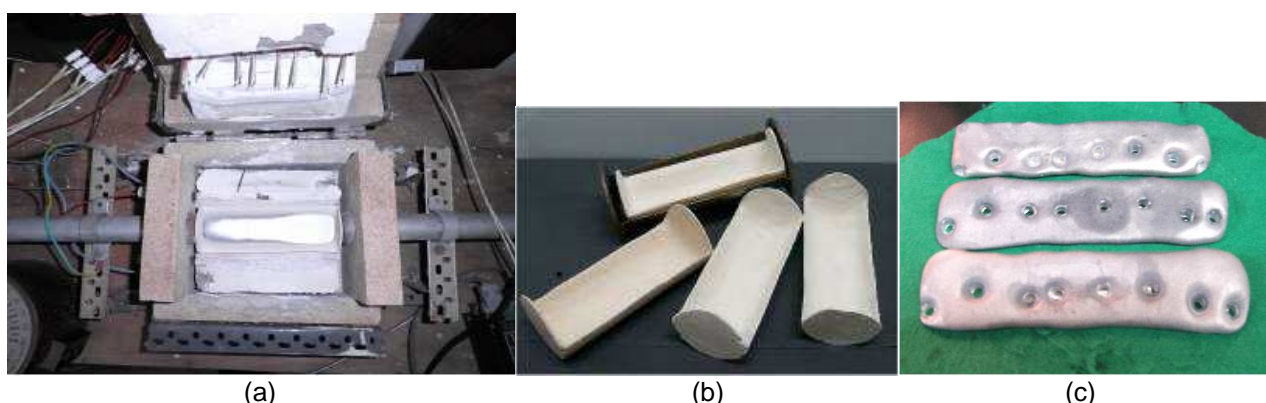


Figura 1. (a) Dispositivo experimental de solidificación direccional. (b) Moldes de arcilla fabricados. (c) Probetas obtenidas.

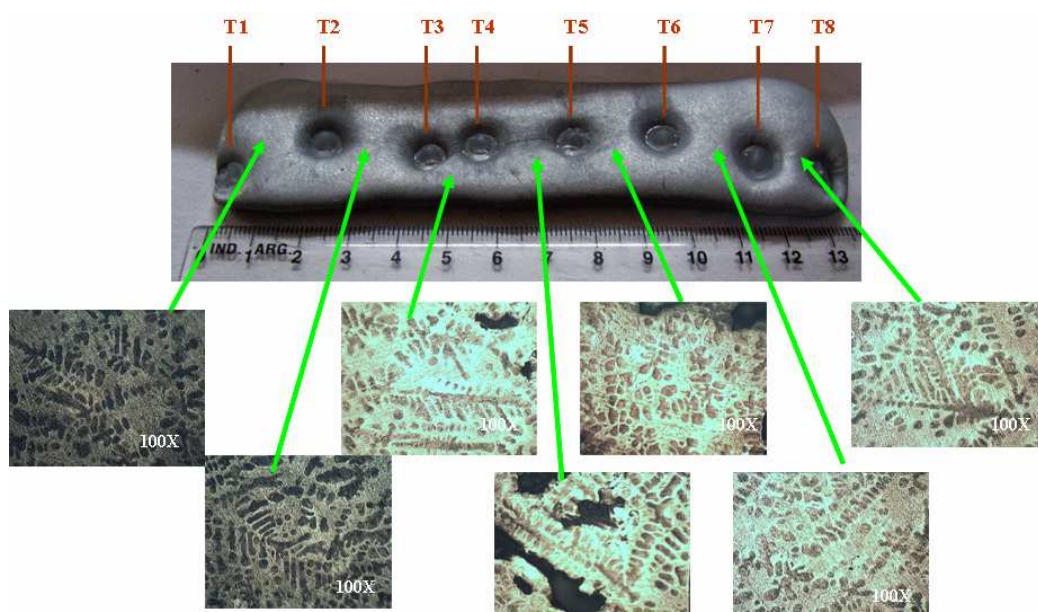


Figura 2. Probeta de aleación ZA-27. Los huecos y las líneas rojas en la foto indican las posiciones en donde se registraron las temperaturas durante la solidificación.

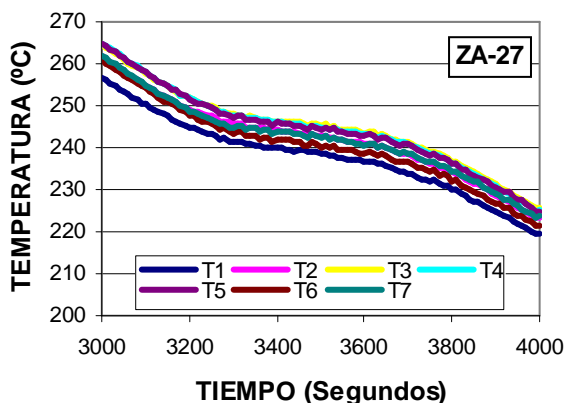


Figura 3. Curva de temperatura versus tiempo.

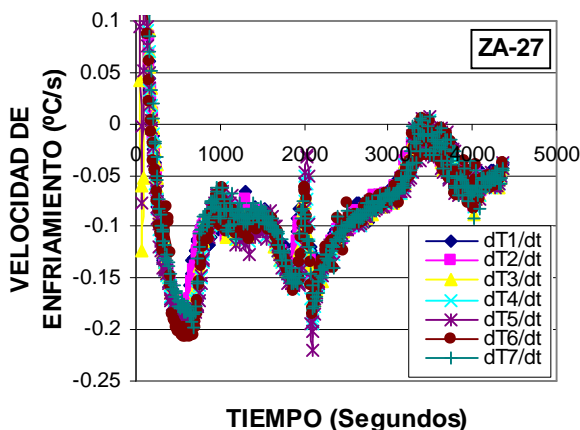


Figura 4. Velocidad de enfriamiento en función del tiempo.

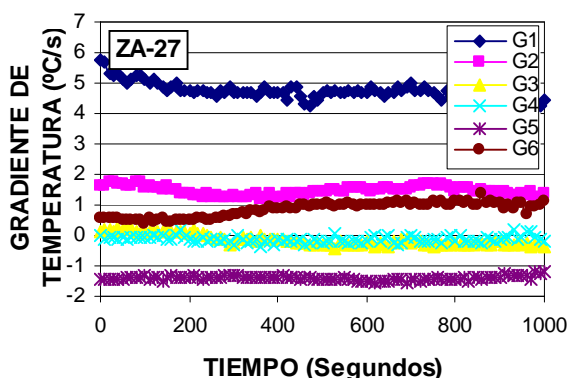


Figura 5. Gradiente de temperatura en función del tiempo.

A fin de determinar los números de Niyama, N_y , se calculó la relación:

$$N_y(x, t) = \frac{\left| \frac{dT}{dx} \right|}{\sqrt[2]{\left| \frac{dT}{dt} \right|}} \quad (1)$$

donde:

$$\frac{dT}{dt}(x, t) = \text{velocidad de enfriamiento}$$

$$\frac{dT}{dx}(x, t) = \text{gradiente de temperatura}$$

Considerando ambos términos como promedios para una posición intermedia entre dos termocuplas adyacentes.

Los N_y se relacionaron con la composición de la aleación, la estructura final de solidificación, la zona de contracción final y con la porosidad (macroporosidad) de las probetas.

Para simular las funciones que determinan los números de Niyama en función de la posición medida desde el extremo izquierdo de las probetas de Zn-Al hipereutéticas se utilizaron funciones del tipo Lorentzianas negativas de dos picos.

Para las aleaciones ZA10, ZA15, ZA17,2 y ZA27, la expresión experimentalmente determinada tiene la forma:

$$\frac{\left| \frac{dT}{dx} \right|}{\sqrt[2]{\left| \frac{dT}{dt} \right|}} = N_{y_0} - \frac{K_1}{4 \cdot (x - x_{c1})^2 + \omega_1^2} - \frac{K_2}{4 \cdot (x - x_{c2})^2 + \omega_2^2} \quad (2)$$

donde K_1 y K_2 son funciones de ω_1 y ω_2 , respectivamente, y son dependientes del tiempo.

La ecuación (2) resulta ser válida para las zonas líquida, pastosa, de crecimiento eutéctico ó zona sólida con la única restricción adicional de que el número de Niyama es nulo para todo valor negativo dado por dicha ecuación.

Ya que K y ω son dependientes del tiempo, se encontró que $\ln K$ resulta ser una función de ω que aparenta ser independiente del

estado de la aleación, esto es, pueden ser expresadas como:

$$K_1 = e^{(m \cdot \omega_1 + b)} \quad (3a)$$

$$K_2 = e^{(m \cdot \omega_2 + b)} \quad (3b)$$

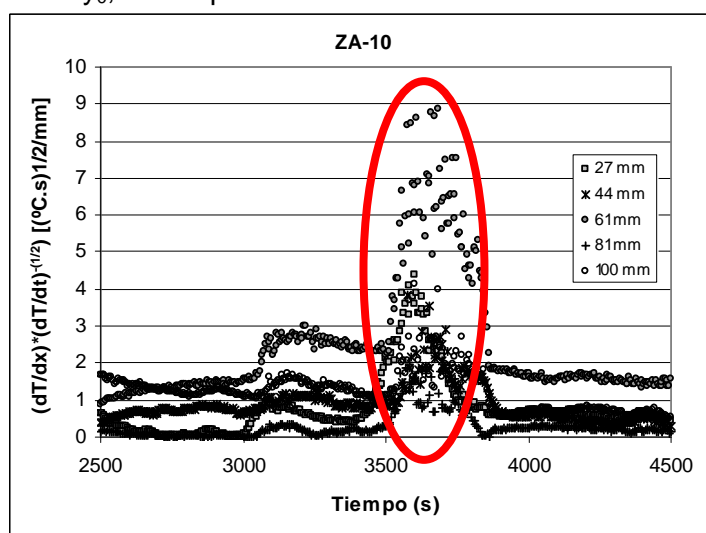
A partir de las relaciones (3a) y (3b), la ecuación (2) se puede escribir en la forma:

$$Ny = Ny_0 - \frac{e^{(m \cdot \omega_1 + b)}}{4 \cdot (x - x_{c1})^2 + \omega_1^2} - \frac{e^{(m \cdot \omega_2 + b)}}{4 \cdot (x - x_{c2})^2 + \omega_2^2} \quad (3)$$

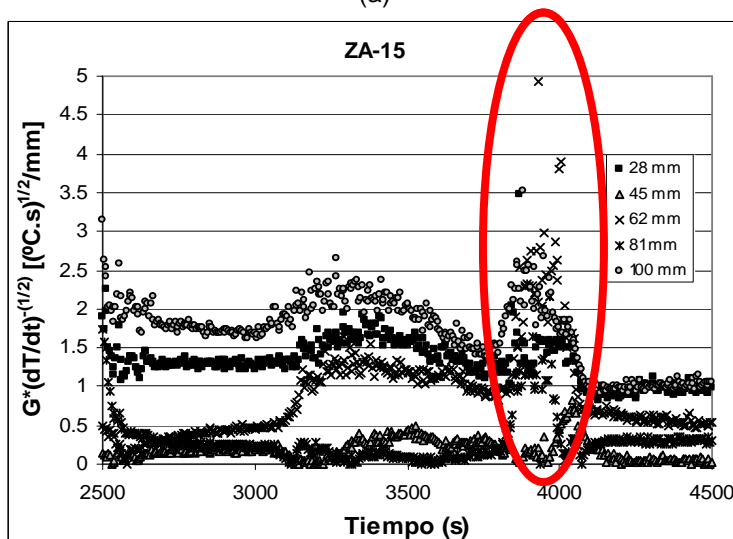
Expresión que se torna dependiente únicamente del valor de Ny_0 , de la posición

de cada pico, x_c , y del ancho de la función de Lorentz negativa, ω .

En la Figura 6 se muestran los números de Niyama en función del tiempo. Los valores fueron calculados a partir de los datos experimentales de temperatura versus tiempo y posición, considerando las posiciones intermedias entre termocuplas adyacentes. Se puede apreciar que la forma de las funciones que adoptan los números de Niyama en función del tiempo es compleja y de difícil determinación, con existencia de valores que tienden hacia infinito cuando dT/dt tiende a cero (es decir en el plateau de temperaturas), como se señala en la Figura 6.



(a)



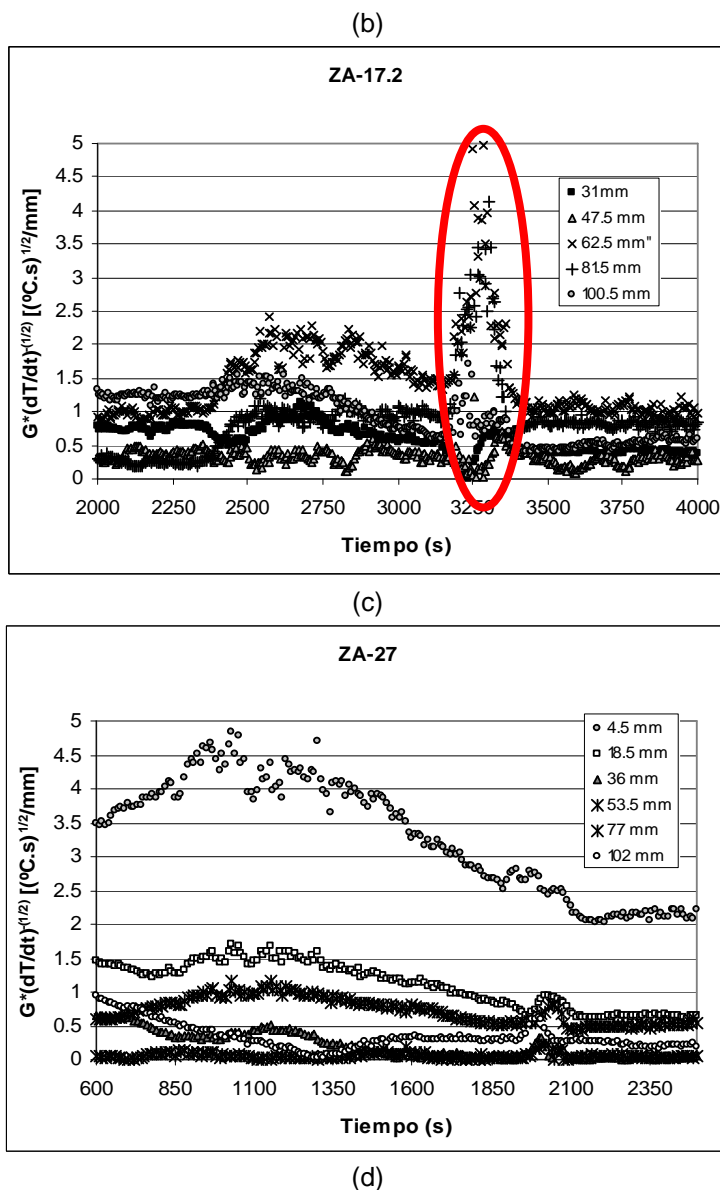
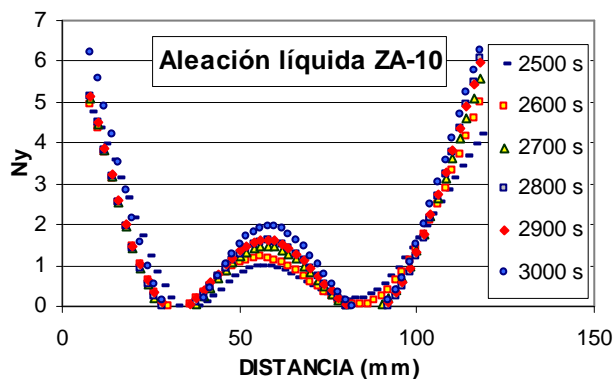


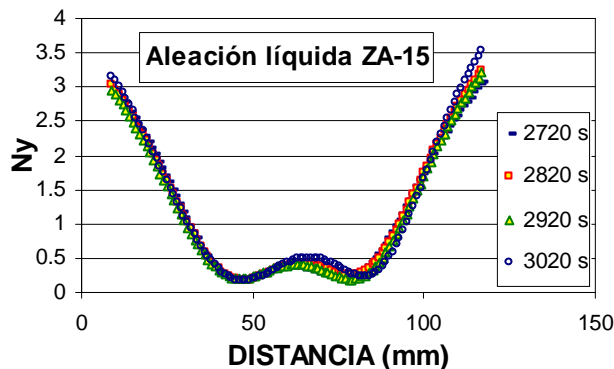
Figura 6. Números de Niyama en función del tiempo. Valores determinados a partir de los datos experimentales. a) Aleación ZA-10, b) Aleación ZA-15, c) Aleación ZA-17,2. d) Aleación ZA-27.

Si bien se realizaron las simulaciones de los NY para los estados líquido, pastoso (S+L), eutéctico (S+L+E) y sólido, aquí se presentan en la Figura 7 los resultados de las simulaciones del número de Niyama en función de la posición en distintos tiempos mediante la función Lorentziana negativa para las cuatro aleaciones para el estado líquido, y en la Figura 8 para el estado sólido. Los coeficientes de correlación entre los valores experimentales y simulados son iguales a la

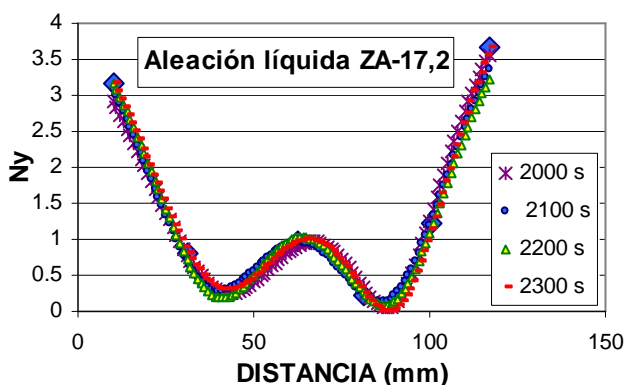
unidad para el estado sólido y para el estado líquido existiendo una muy buena correlación entre las funciones y los datos calculados a partir de los datos experimentales, en tanto que para las simulaciones en el estado pastoso el mínimo coeficiente de correlación determinado es de 0.92769 y en el estado del crecimiento eutéctico el mínimo coeficiente de correlación determinado fue de 0.86946.



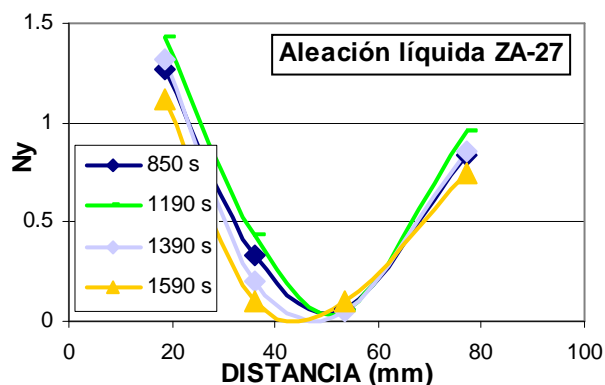
(a)



(b)

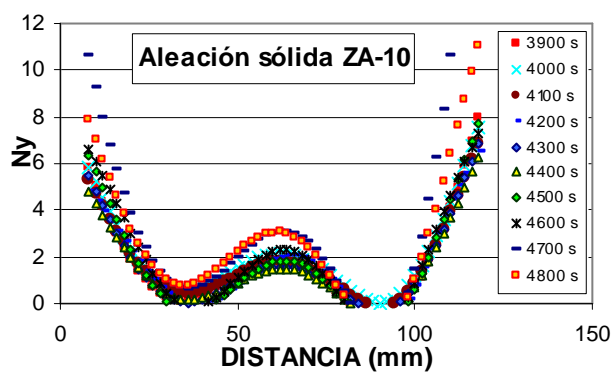


(c)

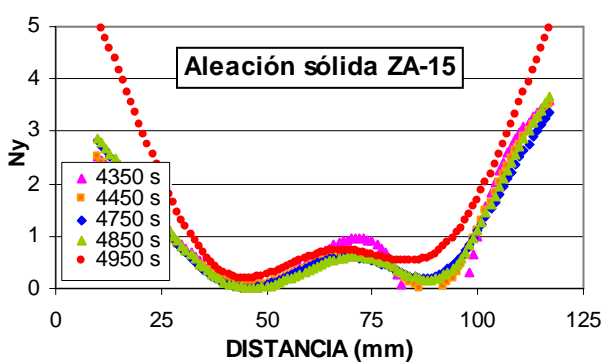


(d)

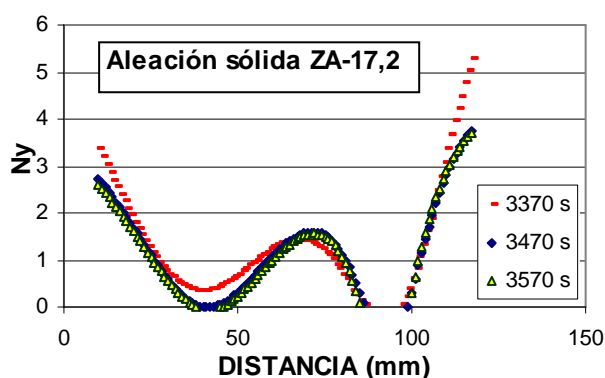
Figura 7. Números de Niyama en función de la posición durante la solidificación. Valores calculados mediante la ecuación (1) para las aleaciones en el estado líquido. a) ZA-10. (b) ZA-15. (c) ZA-17,2. (d) ZA-27.



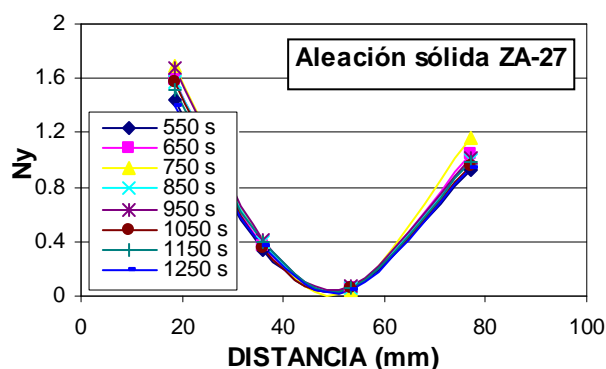
(a)



(b)



(c)



(d)

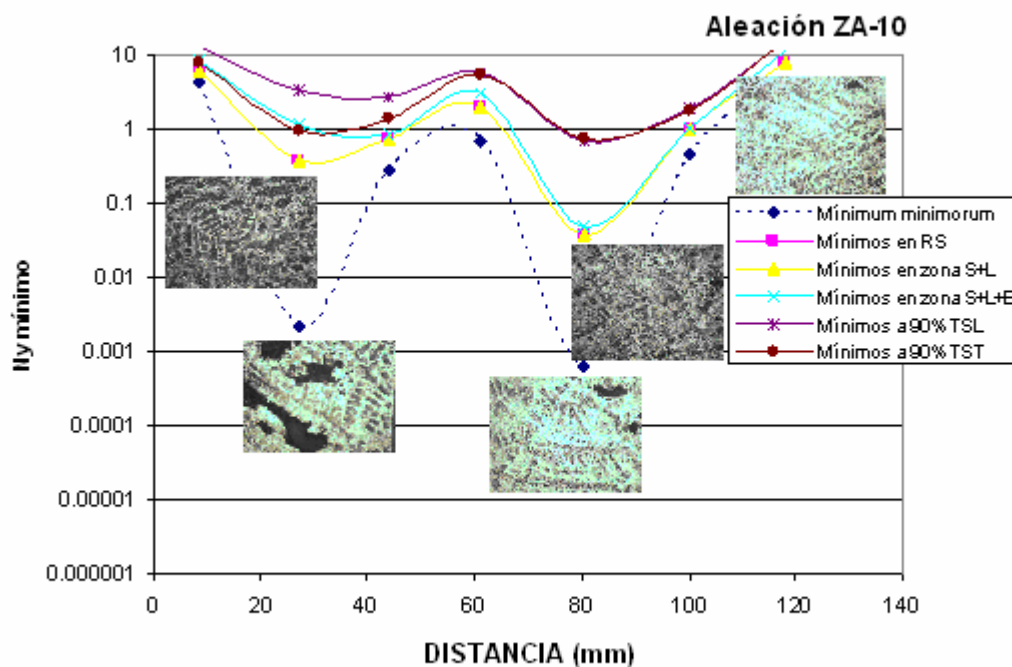
Figura 8. Números de Niyama en función de la posición durante la solidificación. Valores calculados mediante la ecuación (1) para las aleaciones en el estado sólido. a) ZA-10. (b) ZA-15. (c) ZA-17,2. (d) ZA-27.

Se calcularon los números de Niyama mínimos para las cuatro aleaciones en función de la distancia desde el extremo izquierdo, considerando seis diferentes criterios para su determinación:

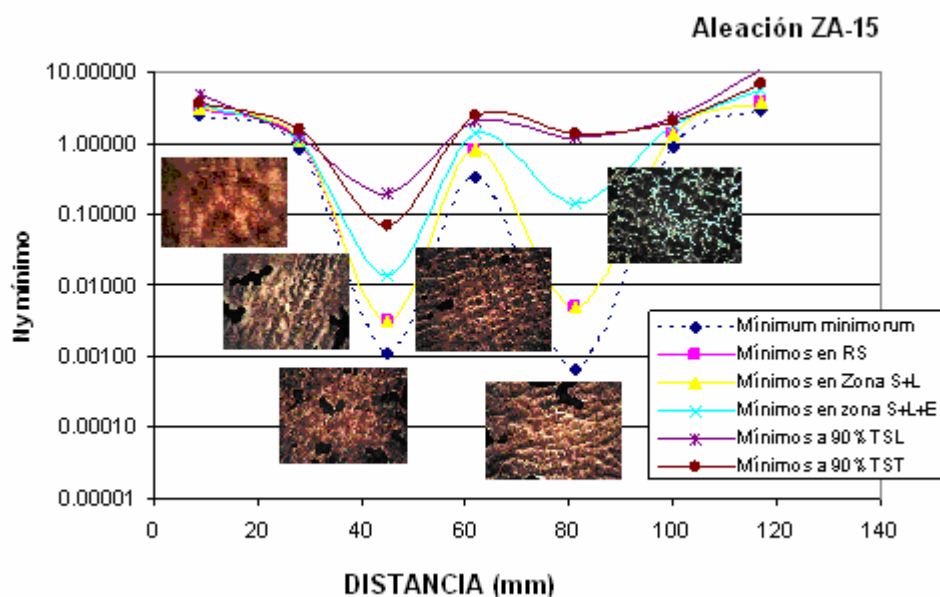
- El primer criterio fue el de determinar el mínimo en todo el rango, desde que la aleación se encuentra en estado líquido hasta el final de la transformación sólido-sólido, como se muestra en la Figura 9 identificado con líneas de trazos (ó minimum minimorum).
- El segundo criterio consistió en la determinación de los números de Niyama experimentales mínimos únicamente en el rango de solidificación (desde T_L hasta T_E).
- El tercer criterio consistió en determinar los números de Niyama mínimos únicamente en el rango en el que la aleación se encuentra en la región sólido-líquido, sin considerar las transformaciones eutécticas.
- El cuarto criterio consistió en determinar los números de Niyama mínimos únicamente en el rango donde ocurre el crecimiento eutéctico.
- El quinto criterio consistió en determinar los números mínimos para el instante correspondiente al 90% de la transformación en cada volumen considerado (ó 90% del tiempo de solidificación local T_{SL} entre termocuplas adyacentes).
- Finalmente, el último criterio se basó en determinar los números de Niyama mínimos en un instante correspondiente al 90 % del tiempo de solidificación total, T_{ST} .

El considerar los números mínimos de Niyama a partir de todos los datos experimentales arroja los valores límites mínimos que puede tomar dicho número para la aleación en cuestión, en las condiciones de solidificación impuestas al sistema, pero estos valores parecen no estar correlacionados con defectos tales como la porosidad, ya que estos mínimos se producen en la zona líquida, pastosa o al final de la solidificación, allí donde ya concluyó el proceso de transformación.

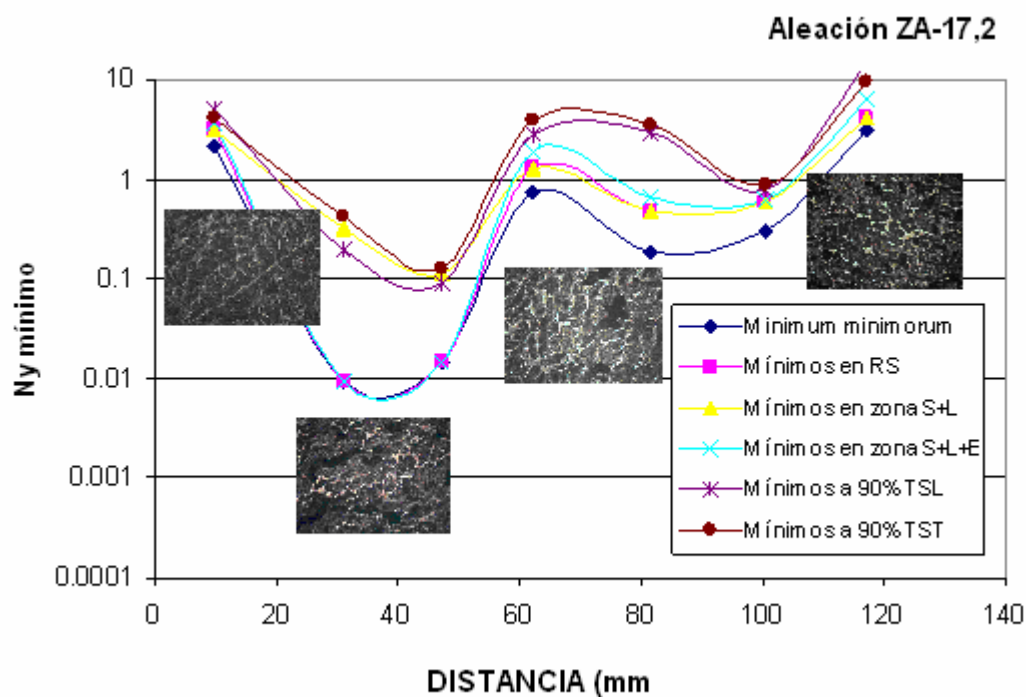
Para las aleaciones hipereutécticas, fue indistinto considerar los números de Niyama mínimos en todo el rango de solidificación ó considerarlos únicamente en la zona sólido-líquido, sin considerar la zona de crecimiento eutéctico, ya que los mínimos se encuentran por lo general en la zona (S+L), con excepción de la aleación ZA-17,2, cuyos mínimos difirieron en las posiciones intermedias de 31 y 47,5 mm. El cuarto criterio arroja valores similares para la aleación ZA-17,2 si se calculan en la zona de crecimiento eutéctico o se calculan en todo el rango de solidificación, ya que los mínimos se producen en la zona (S+L+E). Los criterios del 90% de T_{SL} , ó del 90% de T_{ST} , dan números de Niyama mínimos más elevados en todos los casos, conservándose la tendencia de los números mínimos en función de la distancia, como se puede apreciar en los gráficos de la Figura 9.



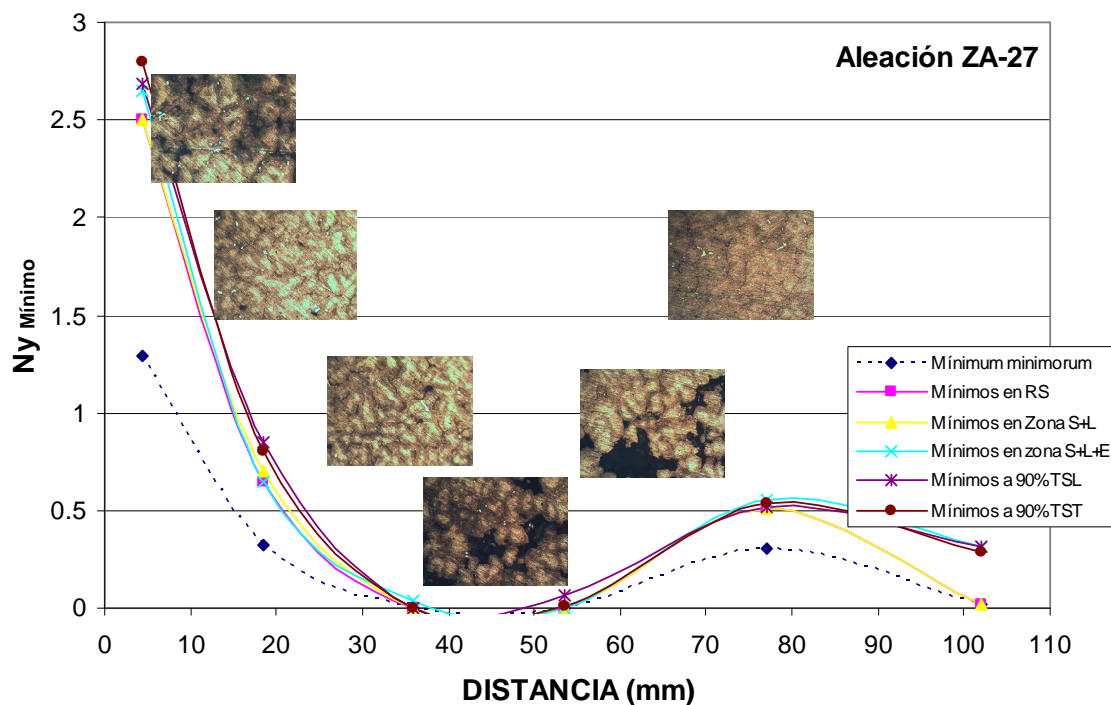
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9. Números de Niyama mínimos en función de la posición evaluados mediante seis criterios diferentes y micrografías selectas en las zonas de su determinación.
a) Aleación ZA-10. b) Aleación ZA-15. c) Aleación ZA-17,2. d) Aleación ZA-27

En las cuatro gráficas de la Figura 9 se puede apreciar que en general, las zonas de mayor porosidad en las probetas ocurren donde se sitúan los mínimos de las funciones de Lorentz negativas.

En la gráfica c) de la Figura 9 correspondiente a la aleación ZA-17,2 se puede observar que no siempre donde se localizan los mínimos números de Niyama determinados experimentalmente se encuentra únicamente la presencia de macroporosidad, existiendo también a valores mayores que los mínimos. Parecería existir un umbral a partir del cual la macroporosidad es evidente y que depende de la concentración de la aleación, pero el valor de dicho umbral depende de cuál es el criterio para la determinación de los números de Niyama mínimos.

CONCLUSIONES

1. Mediante el presente trabajo se han obtenido validaciones experimentales del criterio de Niyama para determinar macro y micro porosidad utilizando aleaciones Zn-Al solidificadas direccionalmente en forma horizontal, en un amplio rango de concentraciones.
2. La forma de las funciones que adoptan los números de Niyama en función del tiempo es compleja y de difícil determinación.
3. La forma de las funciones que adoptan los números de Niyama en función de la posición pudo ser aproximada mediante funciones del tipo Lorentzianas negativas de dos picos con buenos coeficientes de correlación en el caso de las aleaciones ZA-10, ZA-15 y ZA-17,2, en tanto que para la aleación ZA-27 una función Lorentziana negativa de un pico resultó suficiente ($K_2 = 0$).
4. El valor límite del número de Niyama para estas aleaciones, que determina la presencia de la macroporosidad, depende de cuál sea el criterio que se adopte para la determinación de los valores de Ny mínimos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado mediante el subsidio del BID 1728/OC-AR-PICT-O N° 36866 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

Los autores, A.E. Ares y C.E. Schvezov, agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

REFERENCIAS

- [1] Metal finishing, H. T. Kim, Y. S. Jin, Soc. Japan, Kyoto (1981).
- [2] Fluid flow phenomena in metal processing, J. Szekely, Academic Press, New York (1979).
- [3] Rate phenomena in process metallurgy, J. Szekely, J.N. Themelis, Jhon Wiley & Sons, New York (1971).
- [4] Predicting porosity in Nickel-base DS castings, D.R. Poirier, K. Yeum, Proceedings of the 35 Annual Meeting of the Investment Casting Institute, Washington D.C. (1987).
- [5] Round robin study to assess variations in casting simulation Niyama criterion predictions, N. Jain, K. Carlson and C. Beckermann, Proceedings of the 61st Technical and Operating Conference (2008).
- [6] Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion, K. Carlson, C. Beckermann, Metallurgical and Materials Transactions A, 40 (2009) 163-175.
- [7] Vertical and Horizontal Directional Solidification of Zn-Al and Zn-Ag Diluted Alloys, S.G. Gueijman, C.E. Schvezov, A.E. Ares, , Materials Transactions, 51 (10) (2010) 1861-1870.